**Evaluación del proceso de filtración del agua clarificada del río Cauca. Influencia del control de flujo (Tasa declinante – Tasa constante)**

Lina M. Perea-Torres

Ingeniera Sanitaria, MSc. Universidad del Valle. Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental – ECCA. Escuela EIDENAR, Universidad del Valle, Cali - Colombia. linapeto@gmail.com

Patricia Torres-Lozada

Ing. Sanitaria Universidad del Valle. MSc., PhD. Universidad de São Paulo – Brasil. Profesora Titular, Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental – ECCA. Escuela EIDENAR, Universidad del Valle, Cali - Colombia. patricia.torres@correounivalle.edu.co

Camilo H. Cruz-Vélez

Ing. Sanitario Universidad del Valle. MSc. Universidad de São Paulo – Brasil. Profesor Asociado, Grupo de Investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental – ECCA. Escuela EIDENAR, Universidad del Valle, Cali - Colombia. camilo.cruz@correounivalle.edu.co

**Resumen**

La filtración rápida es un proceso complejo e importante dentro de los tratamientos convencionales de agua para potabilización, ya que es la última barrera física para retener partículas y controlar el riesgo microbiológico. En este estudio se evaluó a escala piloto la influencia del control de flujo sobre el proceso de filtración del agua clarificada del río Cauca - planta de potabilización Puerto Mallarino de la ciudad de Cali – Colombia. Los resultados de la operación a tasa declinante, fueron comparados con los resultados de la operación previa de la planta piloto en la modalidad de tasa constante; las variables de control operacional de los filtros fueron la turbiedad de agua filtrada y la pérdida de carga. En general, la operación a tasa declinante permitió un mejor desempeño de los filtros, obteniéndose una menor turbiedad en el agua filtrada durante el periodo de máxima eficiencia y una mejor evolución de la pérdida de carga, comportamiento que está asociado a una mejor distribución de los sólidos sobre el medio filtrante que permite reducir el riesgo de traspaso de partículas a través del filtro.

**Palabras Clave:** Carrera de filtración; Filtración; Pérdida de carga; Tasa Constante; Tasa Declinante.

**Abstract**

Quick filtration is an important and complex process within the conventional treatments of water purification, since it is the final physical barrier to retain particles and control the microbiological risk. This study evaluated at pilot scale, the influence of flow control on the filtration process of the clarified water of the Cauca River on the city of Cali – Colombia (Puerto Mallarino water treatment plant). The results of the operation of the pilot plant on declining rate condition were compared with the results of the previous operation on constant rate; the operational control variables of the filters were filtered water turbidity and load loss. In general, the declining rate operation allowed a better performance of filters, resulting in a lower turbidity in filtered water during the period of maximum efficiency and a better outcome of the load loss, behavior that is associated with a better distribution of solids on the filter medium that allows to reduce the risk of transfer of particles through the filter.

**Keywords:** career of filtration;constant rate; declining rate; filtration; load loss.

**Resumo**

A filtração rápida é un proceso complexo e importante no tratamento covencional de agua para potabilização, pois é a última barreira física para reter partículas e controlar o risco microbiológico. Neste estudo, foi avaliada, em escala piloto, a influencia do controle do fluxo sobre o proceso de filtração da agua clarificada do río Cauca – Estação de Tratamento de Água de Puerto Mallarino da cidade de Cali – Colombia. Os resultados da operação a taxa declinante, foram comparados com os resultados da operação prévia da estação piloto na modalidade de taxa constante. As variáveis de controle operacional dos filtros foram a turbidez de água filtrada e a perda de carga. Em geral, a operação a taxa declinante permitiu um melhor desenvolvimento dos filtros, obtendo-se uma menor turbidez na agua filtrada durante o periodo de máxima eficiencia e uma melhor evolução da perda de carga, comportamento que está asociado a uma melhor distribuição dos sólidos sobre o meio filtrante que permite reducir o risco de traspasso de partículas a través do filtro.

|  |
| --- |
|  |

**Palavras-chave:** carreira de filtração; filtração; perda de carga; taxa constante; taxa declinante.

1. **Introducción**

En el tratamiento de agua para consumo humano, es de gran importancia el concepto de barreras múltiples, el cual es un sistema integrado de procedimientos, procesos y herramientas que en conjunto previenen o reducen la contaminación del agua potable desde la fuente hasta el usuario final, protegiendo la salud pública. En este contexto, cada etapa del Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable – SAAP, representa una barrera frente a los peligros y tiene dos beneficios importantes: *i.* contribuye a la reducción parcial del riesgo, aunque no lo elimine completamente y *ii.* el riesgo ocasionado por la falla de una de las barreras puede ser mitigado o suprimido por las barreras posteriores (Fournier, 2006; Moreno, 2009; Plummer et al., 2010). En la concepción de los SAAP, la planta de tratamiento de agua es la principal barrera para asegurar la producción de un agua adecuada desde el punto de vista de la salud pública (Okun, 2003).

La remoción de material particulado (sólidos suspendidos y coloidales) en los sistemas de tratamiento convencionales, ocurre principalmente en las etapas de sedimentación (previa coagulación y floculación) y en la filtración, la cual es considerada uno de los medios de separación de partículas más utilizados universalmente tanto en los procesos de potabilización como en el tratamiento de aguas residuales (Gao, *et al.*, 2012); adicionalmente, la filtración es la última barrera física para la remoción de partículas y de bacterias y protozoarios como *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium* (Cornwell et al.,2003; Spellman, 2009) y la desinfección es el proceso que complementa la remoción de los patógenos remanentes (Crittenden, 2012).

El control de flujo en la filtración permite que la carga total de la planta se distribuya equitativamente entre la batería de filtros y evita o reduce líneas de flujo preferencial a través de cualquier filtro (Cleasby, 1993a); los dos métodos de control de flujo son la tasa constante - TC y la tasa declinante - TD (AWWA, 2011). En TC la entrada de agua se realiza de modo que el flujo es distribuido equitativamente entre todos los filtros a partir de un vertedero de descarga libre y en TD el flujo puede distribuirse de manera continua o variable; en esta última, la entrada de los filtros se localiza por debajo del nivel mínimo de operación y es conducida por medio de un canal o tubo común, operando como vasos comunicantes (Akgiray y Saatçi, 1998; Di Bernardo y Sabogal, 2009), logrando que cada filtro trabaje con una tasa variable relacionada al nivel de suciedad del filtro.

En general, de acuerdo con Cleasby (1993b), los filtros que operan a TD se basan en la interacción entre la fricción lineal no turbulenta en el orificio de drenaje y la fricción laminar y lineal en los medios filtrantes. El primero es mucho más apropiado en filtros limpios y el segundo es el factor dominante hacia el final de una carrera de filtración, cuando el medio filtrante está altamente obstruido (Escobar, 1992; Mackie *et al*., 2003).

El control de flujo a TD es comúnmente utilizado por razones económicas, puesto que la calidad del efluente filtrado es generalmente comparable con el de los filtros regulados por los controladores de velocidad de flujo (Dabrowski, 2006). Para el diseño de estos filtros generalmente se fija una carga hidráulica con la cual se garantice que la tasa máxima no supere 1,5 veces la tasa media (Di Bernardo y Sabogal, 2009). El lavado frecuente de la batería de filtros genera interrupciones en las plantas de potabilización generando variaciones de caudal y de presión, así la operación a TD reduce significativamente estos cambios, generando beneficios económicos mediante el alargamiento de la carrera de filtración y la reducción de la frecuencia de lavado (Zielina y Dajbrowski, 2011).

Di Bernardo y Cleasby (1980) y Hilmoe y Cleasby (1986) citados por Di Bernardo y Sabogal, (2009) observaron que tanto para agua clarificada en un proceso de tratamiento convencional como para agua coagulada afluente a los filtros de un sistema de filtración directa, la filtración a TD resulta mejor frente a la TC, pues además de que la calidad del agua filtrada es igual o superior, la carga hidráulica necesaria en la filtración con TD es menor.

Baylis (1959) citado por Makie *et al.* (2003) encontró resultados similares de turbiedad en los dos tipos de control de flujo evaluados (TC y TD) en una planta de Chicago (filtración de agua coagulada); Cornwell (1991) citado por Makie *et al*. (2003) encontró un comportamiento similar en la filtración a diferentes tasas del agua coagulada del reservorio de Carolina del Norte. Makie *et al.* (2003) modeló el comportamiento de los dos métodos de control de flujo, encontrando que la pérdida de carga total fue mucho más baja con la operación a TD para un misma duración de la carrera de filtración; la calidad de agua filtrada resultó ligeramente mejor para la operación a TC, pero para periodos con la misma pérdida de carga justo antes del retrolavado, el sistema a TC produjo turbiedades más bajas.

Aunque la filtración ha sido estudiada ampliamente, aún no se ha aceptado un modelo analítico que permita la optimiza­ción no empírica de parámetros del proceso, siendo necesa­rio realizar estudios a escala piloto, pues es una manera muy aproximada de representar lo que sucede dentro de las uni­dades de filtración a escala real, permitiendo además extra­polar datos (Boller, y Kavanaugh, 1995; Jegatheesan y Vigneswaran, 2005). La planta de potabilización Puerto Mallarino (PM) de la ciudad de Cali abastece a más del 60% de la población caleña; este estudio muestra los resultados de la operación de una planta piloto de filtración del agua clarificada de la Planta PM operando en la modalidad de tasa declinante y la comparación con los resultados de la operación previa de la planta en la modalidad de tasa constante.

1. **Materiales y Métodos**
   1. **Relación entre agua cruda y clarificada**

Debido a que la planta piloto de filtración fue operada con agua clarificada de la planta PM y dada la alta variabilidad del agua cruda afluente (Monto­ya *et al.*, 2011), se consideró importante analizar la relación entre las características del agua cruda y su efecto sobre la calidad de agua clarificada durante los ensayos de filtración, lo que se realizó aplicando estadística descriptiva como promedios, medianas, máximos y mínimos.

* 1. **Descripción de la Planta Piloto**

La Figura 1 muestra el esquema de la planta piloto; las columnas son en acrílico (espesor 8mm), de diámetro interno 0,134m, altura 3,75m. A 0,15m del fondo, las columnas cuentan con una placa con 138 orificios (diámetro 0,005m) como soporte del medio filtrante y que distribuye uniformemente el agua del lavado.



Figura 1. Esquema de la planta piloto de filtración

Fuente:

La turbiedad se midió con 2 turbidímetros en línea marca ACCU4 de bajo rango (0 a 100 UNT, precisión 0,001 UNT), con uno se midió la turbiedad del agua clarificada y con el otro la del agua filtrada, para lo cual 5 electroválvulas se programan para controlar el paso del agua de cada filtro hacia el turbidímetro. Las señales de 4 a 20 mA, a través de las cuales estos turbidímetros transmiten los datos, son capturadas en un PLC del cual se transmiten a un computador. La presión se monitoreó en 6 puntos de cada una de las columnas, lo cual se realizó de manera manual apoyándose en piezómetros instalados en cada filtro. Los puntos de medición se ubicaron uno encima del medio filtrante, otro debajo del falso fondo y los 4 restantes distribuidos a lo largo del lecho filtrante.

La configuración del medio filtrante utilizado fue seleccionada en un estudio previo operando la planta piloto en la modalidad de tasa constante (Perea *et al.*, 2013), el cual presentó las siguientes características: medio de doble capa con arena (espesor: 30 cm, tamaño efectivo: 0,56 mm y CU: 1,21) y antracita (espesor: 70 cm, tamaño efectivo: 1,16 mm y CU: 1,41) y medio de soporte compuesto por gravas con los siguientes tamaños: 150 mm de 1/8” - #10, 50 mm de 1/4” - 1/8”, 50 mm de 1/2” - 1/4” y 50 mm de 3/4” - 1/2”.

* 1. **Descripción de los ensayos**

Antes de iniciar la operación de los filtros en la modalidad de tasa declinante, fue necesario calcular los niveles de operación bajo los cuales la planta debía trabajar, para lo cual se realizaron ensayos con agua tratada de la planta PM en los cuales se midieron las pérdidas de carga debidas a los accesorios y al medio filtrante; con esta información y con la tasa media a la cual operan los filtros de la planta PM, se determinó la Ecuación 1 que representa las pérdidas del sistema y posteriormente, con el modelo propuesto por Di Bernardo 1986 citado por Di Bernardo y Sabogal, (2009), se calcularon los niveles de agua y tasas de operación a tasa declinante.

Ecuación 1

Donde,

Y= pérdida de carga total (m)

T = tasa de filtración (m3.m-2.día-1)

Durante la operación del sistema en condición de estabilidad, se midió el comportamiento del nivel de agua (carga hidráulica) en el canal común de ingreso, la tasa de filtración y la turbiedad del agua filtrada. Los niveles de agua en el canal común de alimentación obtenidos fueron: nivel cuando entra en operación un filtro limpio (N1): 0,63m; nivel cuando se debe lavar un filtro (N2): 0,80m y nivel cuando está un filtro por fuera de operación porque se encuentra en lavado (N3): 0,98m. Las tasas de operación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.

Tasas de operación de los filtros funcionando a tasa declinante

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Filtro** | **Tasa durante la operación (m3/m2 día)** | **Tasa durante el lavado (m3/m2 día)** |
| Filtro 1 | 299.18 | 361.50 |
| Filtro 2 | 243.51 | 296.11 |
| Filtro 3 | 197.00 | 240.67 |
| Filtro 4 | 158.69 | - |

El inicio de operación en la modalidad de tasa declinante de los cuatro filtros de la planta piloto, se realizó de manera simultánea y el lavado de cada filtro se realizó cada seis horas durante las primeras 24 horas, de acuerdo con lo recomendado por Di Bernardo y Sabogal (2009) para el arranque de sistemas a tasa declinante. Una vez se terminaron estos lavados escalonados, se operó el sistema hasta que el nivel de agua en el tubo común de alimentación llegara a N2 y se procedió a lavar el filtro con más horas de operación; de aquí en adelante, cada vez que se alcanzó N2 en el sistema se realizó el mismo procedimiento denominando a este periodo ciclo; el ensayo se realizó hasta completar 8 ciclos de funcionamiento.

* 1. **Definición de variables operativas y de control hidráulico**

Para los ensayos se definió que cada carrera de filtración finalizaría cuando la turbiedad del agua filtrada fuese superior a 0,7 UNT (USEPA, 2004) o se alcanzara una pérdida de carga – PC mayor a 1,5m o el tiempo de la carrera de filtración alcanzara las 72 horas, de acuerdo a lo recomendado por AWWA (2011) y Arboleda, (2000). El lavado de cada filtro se realizó generando una expansión del medio de 30% durante el tiempo requerido para alcanzar valores de turbiedad en el agua de lavado menor a 5,0 UNT (Cruz, 1993), lo cual se garantizó realizando mediciones de turbiedad a muestras de agua provenientes del lavado.

Como variable de respuesta se utilizó la turbiedad del agua filtrada, la cual fue medida cada 11,6 min en el agua filtrada y cada 10 s en el agua clarificada determinada como parámetro de control. Adicionalmente, se realizó la medición de la PC cada 3 horas en la etapa de máxima eficiencia y se realizó la medición del nivel de agua en el tubo común cada 10 min.

* 1. **Evaluación de la influencia del control de flujo sobre el desempeño de la filtración**

Teniendo en cuenta que la planta piloto fue operada previamente en la modalidad de tasa constante y con la misma configuración del medio filtrante (Perea *et al.*, 2013), se realizó un análisis comparativo de las dos modalidades de flujo (Tasa declinante y Tasa constante). Para lograrlo, se analizaron los resultados de turbiedad de agua filtrada durante los periodos de máxima eficiencia de los filtros, el cual se definió como el periodo inmediatamente después del periodo de maduración (AWWA, 2001) cuando se alcanzan turbiedades menores a 0,3 UNT, hasta alcanzar las 72 horas de la carrera de filtración (AWWA, 2011; Arboleda, 2000) o hasta que la turbiedad del agua filtrada alcanzara nuevamente valores de 0,3 UNT.

1. **Resultados y análisis**
   1. **Relación entre agua cruda y clarificada**

La Tabla 2 presenta el comportamiento de la turbiedad del agua cruda que ingresó a la planta PM durante el estudio y el agua clarificada producida por la misma. En la tabla se observa que el proceso de clarificación de la planta es muy eficiente en términos de remoción de material particulado, ya que independiente de la alta variación de la turbiedad del agua cruda, se alcanza una significativa reducción de la turbiedad, con valores en el agua clarificada menores que 5 UNT durante el 93% del tiempo. Estos valores son considerados adecuados por AWWA (1997) que establece 1 UNT como valor objetivo promedio y máximo 5 UNT y son comparables con los resultados reportados por Perea *et al*. (2013) en la operación de la planta piloto en la modalidad de tasa constante.

Tabla 2.

Turbiedad del Agua Cruda y Clarificada

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Turbiedad** | **Agua cruda** | **Agua clarificada** |
| Promedio (UNT) | 200,90 | 2,72 |
| Mediana (UNT) | 190,00 | 2,32 |
| Mínimo (UNT) | 150,00 | 1,01 |
| Máximo (UNT) | 399,00 | 9,37 |
| Desviación estándar | 43,7 | 1,3 |
| % datos > 5,0 UNT | 100 | 6,9 |
| % datos entre >2,0 y ≤ 5,0 UNT | - | 70,3 |
| % datos ≤ 2,0 UNT | - | 22,9 |
| Coeficiente de variación (%) | 21,7 | 47,4 |
| No. Datos | 163 | 3020 |

* 1. **Operación a Tasa declinante**

La etapa de arranque del sistema tuvo una duración de aproximadamente 72 horas, tiempo en el cual éste alcanzó el nivel N2, punto a partir del cual se inició la operación a tasa declinante. En la Figura 2 se presenta el comportamiento del nivel de agua (carga hidráulica) en el canal común de ingreso, la tasa de filtración y la turbiedad del agua filtrada durante la operación del sistema en condición de estabilidad.



**Figura 2.** Curva de variación del nivel de agua en el canal común de ingreso, tasa de filtración y turbiedad de agua filtrada

En esta Figura se observa que cuando se finalizó el ensayo, algunos filtros no habían culminado la carrera de filtración, lo cual está relacionado con la operación a tasa declinante, ya que en esta condición todos los filtros trabajan con una diferencia en el tiempo de operación, de tal manera que cuando un filtro finaliza la carrera de filtración, los otros aún se encuentran en operación (AWWA, 2011).

En cuanto a los niveles de operación del sistema, experimentalmente se obtuvieron valores similares a los teóricos calculados con el modelo de Di Bernardo (1986) citado por Di Bernardo y Sabogal (2009, encontrándose las mayores diferencias en los niveles N3 (diferencias no mayores al 6%), las cuales pueden estar relacionadas con ligeras variaciones en parámetros de operación como la tasa media de ingreso o con incertidumbre en la escala de medida en las mediciones del nivel de agua.

Respecto de la tasa de filtración, se observa que tal como lo presentan diversos autores (Di Bernardo y Cleasby, 1980; Zouza, 1990 y Teixeira, 1991) citados por Di Bernardo (1983) y Escobar (1992), la tasa de filtración varía de un filtro a otro encontrándose que, de acuerdo al nivel de colmatación de los filtros, la tasa de filtración varía siendo menor para el filtro más sucio. Comparando las tasas de filtración medidas experimentalmente en cada filtro (aproximadamente 160, 200, 240 y 290 m3/m2 día) se encontró que coincidieron con las tasas teóricas mostradas en la Tabla 1.

En la Tabla 3 se presenta el resumen del comportamiento de la turbiedad del agua filtrada durante el periodo de maduración tanto en cada filtro como en el agua proveniente de la mezcla de los cuatro filtros, datos obtenidos durante los 8 ciclos de operación. En esta tabla se encuentra que, como lo plantean diversos autores (Di Bernardo y Cleasby, 1980; Hilmoe y Cleasby, 1986; de Souza, 1990; Teixeira, 1991) citados por Escobar (1992), la calidad del agua durante este periodo presenta un deterioro significativo para el filtro que se lavó en comparación con los filtros que siguen en operación como se presenta en la Figura 2.

Tabla 3.

Turbiedad del agua filtrada en los periodos de maduración del ensayo

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Descripción** | **F1** | **F2** | **F3** | **F4** | **Mezcla\*** |
| Promedio | 2,56 | 1,44 | 1,04 | 0,94 | 0,66 |
| Mediana | 0,94 | 0,63 | 0,39 | 0,62 | 0,40 |
| Mínimo (UNT) | 0,300 | 0,330 | 0,105 | 0,210 | 0,140 |
| Máximo (UNT) | 9,40 | 4,63 | 6,08 | 6,18 | 3,26 |
| Desviación Estándar (UNT) | 3,20 | 1,33 | 1,73 | 1,04 | 0,75 |
| % datos > 2,0 UNT | 32% | 31% | 12% | 7% | 10% |
| % Datos entre ≥ 0,3 y ≤ 2,0 UNT | 68% | 69% | 65% | 89% | 53% |
| % datos < 0,3 UNT | 0% | 0% | 23% | 4% | 37% |
| No. Datos | 19,00 | 42,00 | 20,00 | 81,00 | 107,00 |

\*Agua filtrada proveniente de los 4 filtros

Durante el periodo de maduración se encontró que en algunos momentos la turbiedad del agua filtrada es mayor que la turbiedad del agua clarificada, lo cual puede deberse a que tanto en el filtro como en las líneas, queda agua retenida que está conformada por agua limpia que quedó en el sistema de drenaje, agua remanente del lavado que quedó dentro del medio y agua remanente sobre el medio filtrante (Amirtharajah y Wetstein, 1980 citados por Colton *et al.*, 1996).

El análisis del comportamiento de la turbiedad del agua resultante de la mezcla de los 4 filtros, muestra valores menores que los de los filtros individuales debido a que en esta modalidad de flujo, mientras un filtro está en el periodo de maduración, los demás están en periodo de máxima eficiencia, lo que ayuda a disminuir los valores de turbiedad que se registran en la mezcla. Sin embargo, el hecho de que el agua mezclada de los 4 filtros presente un 9% de valores de turbiedad superior a 2,0 UNT, valor reglamentado por MPS y MAVDT (2007) para el agua potable, podría indicar que para este tipo de agua cruda y clarificada, sea insuficiente considerar una batería de solo 4 filtros; al respecto, Crittenden (2012) indica que plantas con capacidad amplia de tratamiento deben contar con mínimo 4 filtros, mientras que Kawamura (2000) menciona que plantas muy grandes (9 m3/s) pueden fácilmente exceder los 30 filtros; sin embargo, el número total de filtros puede ser limitado por el tamaño (hasta un límite práctico de por ejemplo 100 m2) y/o por altas tasas de filtración (20 m/h). En el caso de la planta PM, se dispone de 24 unidades de filtración, lo que garantiza un adecuado proceso de filtración.

El contar con un mayor número de filtros aporta al proceso robustez, ya que permite reducir la magnitud de los cambios en la calidad del agua durante las diferentes fases en la carrera de filtración, en comparación con operar con un solo filtro; esto es un concepto similar al de barreras múltiples, en donde la falla de una de las barreras puede ser mitigado o suprimido por las barreras posteriores, garantizándose el aseguramiento en la producción de un agua adecuada desde el punto de vista de la salud pública (Fournier, 2006; Moreno, 2009; Plummer et al., 2010)..

En la Tabla 4 se presentan los datos obtenidos de turbiedad de los periodos de máxima eficiencia durante los 8 ciclos de operación de la planta. En ésta se observa que la turbiedad del agua mejora considerablemente respecto al periodo de maduración, con valores de turbiedad menores a 0,3 UNT (valor máximo de turbiedad recomendado por USEPA (2006) para control de riesgo microbiológico por *Cryptosporidium* en dos muestras tomadas en un tiempo no mayor a 15 min).

Tabla 4.

Turbiedad del agua filtrada en los periodos de máxima eficiencia del ensayo

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Descripción** | **F1** | **F2** | **F3** | **F4** |
| Promedio (UNT) | 0,133 | 0,121 | 0,122 | 0,109 |
| Mediana (UNT) | 0,125 | 0,115 | 0,115 | 0,110 |
| Mínimo (UNT) | 0,065 | 0,055 | 0,050 | 0,055 |
| Máximo (UNT) | 0,295 | 0,290 | 0,345 | 0,275 |
| Percentil 95 (UNT) | 0,200 | 0,190 | 0,210 | 0,155 |
| Desviación estándar (UNT) | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,03 |
| % datos ≤ 0,15 UNT | 74,3% | 88,5% | 89,4% | 93,47% |
| % datos ≥ 0,3 UNT | 0,0% | 0,0% | 1,8% | 0,00% |
| % Datos entre > 0,15 y < 0,3 UNT | 25,7% | 11,5% | 8,7% | 6,53% |
| Coeficiente de variación (%) | 27,7% | 32,6% | 35,2% | 28,2% |
| No. Datos | 1520 | 1497 | 1468 | 1408 |

La estadística corresponde a todos los datos por filtro de los ciclos evaluados. Se trabajó de esta manera, ya que se constató que los datos reportados en la tabla corresponden a las etapas de máxima eficiencia de todos los ciclos evaluados.

Respecto de la turbiedad en el agua filtrada, en general fue constante durante toda la operación del sistema; sin embargo, entre los ciclos 5 y 6 se presentó un pico de turbiedad, el cual es característico en el proceso de filtración y puede ser debido a problemas en la coagulación según lo reportan la USEPA (2004) y AWWA (2011). Adicionalmente se observa que, exceptuando el periodo en que se presentó el pico de turbiedad durante el lavado, la turbiedad en el efluente de los filtros que no se estaban lavando, no se vio afectada por el incremento de la tasa de filtración (ver Figura 2).

En la Tabla 5 se muestra la duración de las carreras de filtración que se obtuvieron durante los 8 ciclos de operación y los tiempos de maduración de cada carrera; se observa que la duración promedio fue de 40,8 horas con un máximo de 49,2 horas y un mínimo de 33,9 horas. En cuanto a los periodos de maduración que se presentaron, éstos variaron de 2.7 min hasta de 26,1 minutos con un promedio de 15,5 min, tiempo mayor a los 15 min recomendados por AWWA (1997). Como caso particular, se manejó el periodo de maduración de F4 en el ciclo 6, en donde se registró un tiempo de 165,6 min, el cual no se contabilizó dentro de la estadística pues éste se consideró como un valor atípico y está relacionado con un pico de turbiedad que se presentó en el agua filtrada no solo en este filtro sino en todo el sistema (ver Figura 2).

Tabla 5.

Duración de carreras y tiempos de maduración durante la operación a tasa declinante

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Filtro** | **Duración de carreras (horas)** | **Ciclos de cada carrera/filtro** | **Tiempo de maduración (min)** |
| F1 | 33,9 | C5– C8 | 12,0 |
| 40,2 | C9-C12 | 2,7 |
| SD | C13 – SD | 9,4 |
| F2 | 39,1 | C6 – C9 | 16,4 |
| 42,2 | C10 – C13 | 16,4 |
| SD | C14 – SD | 23,4 |
| F3 | 42,7 | C7 – C10 | 12,0 |
| 49,2 | C11 – C10 | 26,1 |
| F4 | 38,0 | C8 – C11 | 21,4 |
| SD | C12 – SD | 163,8 |
| **Promedio** | **40,8** |

SD = sin determinar, pues al finalizar el ensayo en estos casos no había finalizado la carrera de filtración

La Figura 3 presenta el comportamiento de la pérdida de carga registrada durante los 8 ciclos del ensayo. En ésta se observa que en cada ciclo, la pérdida de carga en la antracita se incrementa mientras que en la arena en general es constante, ya que en la antracita se presenta el mayor descenso de la porosidad y por lo tanto mayor retención de sólidos. Durante los ciclos 5 y 6, se observó que la pérdida de carga en la arena presentó un incremento, lo cual coincidió con el pico de turbiedad que se presentó durante estos ciclos, lo que evidencia que durante este periodo se presentó algún problema operacional que generó que partículas lograran atravesar los lechos de antracita y de arena y que otras hayan traspasado el filtro.



Figura 3. Curva de variación pérdida de carga total de la arena y antracita

En la Figura 3 también se observa que para un filtro limpio, la mayor pérdida de carga se presenta en la capa de arena, mientras que la menor se presenta en la antracita; esta situación impacta en el comportamiento de la turbiedad, pues como ocurrió durante los periodos de maduración, la calidad del agua filtrada es menor debido a que durante estos periodos las partículas son retenidas principalmente por la última capa de filtración, lo cual permite el traspaso de partículas.

* 1. **Evaluación de la influencia del control de flujo sobre el desempeño de la filtración**

Un aspecto que permite hacer una comparación válida del comportamiento de la planta piloto de filtración en las dos modalidades de control de flujo, es que la calidad de agua clarificada que alimentó la planta en las dos condiciones fue similar, ya que en ambos casos más del 90% de los datos de turbiedad del agua clarificada fueron menores a 5,0 UNT y los coeficientes de variación variaron en un orden del 5%.

Con relación a la calidad de agua filtrada, la operación a tasa declinante presentó mejor desempeño que la tasa constante, con un porcentaje de registros de turbiedad menores a 0,15 UNT de más del 70% comparado con aproximadamente un 52% en la operación a tasa constante (Perea et al., 2013); así mismo, se encontró que las pérdidas de carga fueron 0,80m y 1,10m en TD y TC, respectivamente para una carrera de filtración de 40 h. Estos resultados coinciden con lo encontrado por algunos autores (Di Bernardo y Cleasby, 1980; Hilmoe y Cleasby, 1986) citados por Di Bernardo y Sabogal (2009y Makie *et al.* (2003), quienes señalan que la operación de los filtros en la modalidad de tasa declinante, al garantizar una menor pérdida de carga, presentan una menor presión sobre el medio filtrante, favoreciendo el proceso.

Un análisis detallado del comportamiento obtenido de la PC, muestra que en la operación a tasa declinante, la PC en la arena disminuye en cada ciclo durante toda la carrera mientras que ésta incrementa en la antracita, a diferencia de lo que sucede a tasa constante, en donde la PC de la arena aumenta hasta el momento en el que la PC de la antracita la supera; esta situación puede reflejar que la operación a TD permite una mejor distribución de sólidos en la capa de antracita, generando una disminución en la porosidad de este medio, favoreciendo así la retención de partículas y disminuyendo el riesgo de traspaso de partículas por la arena y de esta manera incidiendo positivamente sobre la calidad del agua filtrada .

1. **Conclusiones**

Para el agua clarificada evaluada en la planta piloto de filtración, el comportamiento de la calidad del agua filtrada indica que entre las dos modalidades de control de flujo evaluadas, la tasa declinante presenta mejores niveles de turbiedad que la tasa constante.

La operación a tasa declinante también reportó una menor pérdida de carga para un mismo tiempo de operación en comparación con la tasa constante; adicionalmente, en la tasa declinante la pérdida de carga en la arena no supera la de la antracita, comportamiento que puede indicar que esta modalidad de flujo favorece una mejor distribución de sólidos sobre el medio filtrante, lo que genera un menor riesgo de traspaso de partículas a través del filtro.

1. **Agradecimientos**

Esta investigación fue realizada con el apoyo técnico y finan­ciero de COLCIENCIAS, EMCALI EICE ESP y la Univer­sidad del Valle en el marco del Proyecto “Identificación, eva­luación y manejo del riesgo en el sistema de abastecimiento de agua de la red baja de la ciudad de Cali, enmarcados en un Plan de Seguridad del Agua (PSA)”.

**Referencias Bibliográficas**

|  |
| --- |
| Akgiray, Ö., y Saatçi, A. A critical look at declining rate filtration design. *Water Science and Technology.*1998. 38, 89-96. |
| Arboleda, V. Teoría y práctica de la purificación del agua. Tercera Edición, Tomo 2, Editorial McGraw- Hill, 2000. Colombia. |
| AWWA. Self-Assessment Guide for Surface Water Treatment Plant Optimization”. *American Water Works Association*. 1rs International Edition, US,1997. |
| AWWA. Water Quality y Treatment: A Handbook on Drinking Water. *American Water Works Association*, McGraw Hill Professional, 6th Edition, USA, 2011. |
| Boller, M. y Kavanaugh, M. Particle Characterics and Head Loss Increase in Granular Media Filtration. *Water Research*. 1995,29(4), 1139-1149. |
| Cleasby, J. Declining rate filtration. *Water Science & Technology.* 1993a, 27(7-8)**,** 11-18. |
| Cleasby, J. Status of declining rate filtration design. *Water Science & Technology*. 1993b, 27(10), 151-164. |
| Colton, J., Hills, P. y Fitzpatrick, C. Research Note. Filter Backwash and Start-up Strategies for Enhanced Particuale Removal. *Water Research*. 1996, 30(10), 2502-2507. |
| Cornwell, D., Macphee, M., Brown, R. y Via, S. Demonstrating Cryptosporidium removal using spore monitoring at lime-softening plants. *J. Am. Water Works Assoc*. 2003, 124-133. |
| Crittenden, J., Trussell, R., Hand, D., Howe, K. y Tchobanoglous, G. MWH’s Water Treatment: Principles and Design. John Wiley & Sons, 2012. |
| Cruz, C. Filtração Direta Ascendente com Alta Taxa. *Dissertação para Obtenção do Tiuo de Mestre em Hidráulica e Saneamento*, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, 1993. |
| Dabrowski, W. The progression of flow rates in variable declining rate filter systems. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 34. 2006, 442-452. |
| Di Bernardo, L. Características Hidráulicas dos Métodos de Operação dos Filtros Rápidos de Gravidade. *Revista DAE*. 1983, No. 135, 30-36. |
| Di Bernardo, L., Sabogal Paz, L.P. Seleção de tecnologias de tratamento de água, Editora LDiBe Ltda. Ed, 2009. |
| Escobar J. Influencia da Capacidade de Armazenamienta de Agua a Montante dos Filtros no Funcionamento de Sistemas de Filtração com Taxa Declinante. *Dissertação para Obtenção do Tiuo de Mestre em Hidráulica e Saneamento*, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, 1992. |
| Fournier, B. Gestión del Riesgo Sanitario en la Regeneración del Agua. *Tesina de Especialización*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2006. |
| Gao, P., Xue, G., Song X-s. y Liu, Z-h. Depth Filtration Using Novel Fiber-Ball Filter Media for the Treatment of High-Turbidity Surface Water. *Journal Separation and Purification Technology.* 2012, 95, 32-38. |
| Jegatheesan, V. y Vigneswaran, S. Deep Bed Filtration: Mathematical Models an observations. *Environmental Science and Technology*. 2005,35(3), 515-569. |
| Kawamura, S.. Integrated Desing of Water Treatment Facilities. 2nd Edition, John Wiley & Sons. |
| Mackie, R., Zielina, M. y Dabrowski, W. Filtrate quality from different filter operations. *Acta hydrochimica et hydrobiologica.* 2003*,* 31**,** 25-35. |
| Montoya, C., Loaiza, D., Torres, P., Cruz, C. y Escobar, J. Efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de procesos convencionales de potabilización. *Revista EIA***.** 2011,No. 16. 1794-1237. |
| Moreno, J. Avaliaçao e Gestao de Riscos no Controle da Qualidade da Água em Redes de Distribuiçao: Estudo de Caso. *Tese (Doutorado)*. Escola de Engenharia de Sao Carlos Universidade de Sao Paulo, Brasil. 2009. |
| MPS y MAVDT. Resolución 2115. Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia. 2007. |
| Okun, D. Drinking water and public health protection. In: PONTIUS, F.W. *Drinking water regulation and health*. John Wiley & Sons Inc. 2003, 13-14. |
|  |
| Perea-Torres, L., Torres-Lozada, P. Cruz-Vélez, C. y Escobar-Rivera, J. Influencia de la Configuración del Medio Filtrante sobre el Proceso de Filtración del Agua Clarificada del Río Cauca. *Revista de Ingeniería*, Universidad de los Andes. 2013, No. 38, 38-44 |
| Plummer, R. Velaniskis, J. Grosbois, D. Kreutzwiser, R. De loe, R. The development of new environmental policies and processes in response to a crisis: the case of the multiple barrier approach for safe drinking water. Environmental Science & Policy. 2010, 13(6), pp. 535 – 548. |
| Spellman, F. Handbook of water and wastewater treatment plant operations. Lewis Publisher. 2nd Edition, 2009. CRC Press, Taylor and Francis Group, London, 826 pp. |
| USEPA. Long Term 1 Enhanced Surface Water Treatment Rule Turbidity Provisions, Technical Guidance Manual. *United States Environmental Protection Agency.* 2004.  http://water.epa.gov/lawsregs/rulesregs/sdwa/mdbp/upload/ 2004 11 22 mdbp\_lt1eswtr\_guidancelt1 turb.pdf |
| USEPA. National Primary Drinking Water Regulations: Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule – Part II. *United States Environmental Protection Agency.* 2006. |
| Zielina, M. y Dajbrowski, W. Impact of raw water quality on operation of variable declining rate filter plants. *Environment Protection Engineering.*2011, 37, 133-140. |